

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 7 篇

传 热



化学工业出版社

化学工程手册

第 7 篇

传 热

《化学工程手册》编辑委员会

化学工业出版社

本篇是《化学工程手册》第7篇，主要对各种不同类型的传热及有关的计算作了系统的介绍。全书分五章，分别讨论了热传导、对流传热及辐射传热的有关问题；讨论了有相变化的传热过程的计算以及传热过程的强化手段。最后对设备设计所依据的主要参数的计算作了介绍。

本书可供化学工业及有关工业部门的设计、研究人员、工厂技术人员及有关院校师生参考。

化学工程手册

第 7 篇

传 热

编写人	林纪方	大连工学院	钱家麟	华东石油学院
	郭宜祐	大连工学院	黄祖祺	华东石油学院
	盛展武	大连工学院	马克承	成都科技大学
	蔡振业	大连工学院	谭盈科	华南工学院
审校人	林纪方	大连工学院		

责任编辑：陈志良

封面设计：任 辉

化学工业出版社 出版

（北京和平里七区十六号楼）

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 787×1092¹/₁₆ 印张 7³/₄ 字数 188 千字 印数 1—6,270

1986 年 11 月北京第 1 版 1986 年 11 月北京第 1 次印刷

统一书号 15063·3825 定价 1.70 元

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十年代和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤(力)-秒”工程制(MKfS制)。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制(SI)，除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月

附录 MKfS 制与 SI 制换算简表

kg	乘以9.81	=N (牛顿)
kg/cm²	9.81×10^4	N/m²
atm	1.013×10^5	N/m²
cP	10^{-3}	N · s/m²
kg · m	9.81	J (焦耳)
kW · h	3.6×10^6	J
kcal	4187	J
kcal/kg · °C	4187	J/kg · K
kcal/m · h · °C	1.16	W/m · K

目 录

概述	(1)	似	(26)
7.1 热传导	(2)	(2) 层流传热	(27)
7.1.1 热传导基本方程式和导热系数	(2)	(2.1) 圆管	(27)
(1) 傅立叶 (Fourier) 定律	(2)	(2.2) 环隙	(28)
(2) 三向热传导微分方程式	(2)	(2.3) 平行板间和矩形通道	(28)
(3) 导热系数	(2)	(2.4) 浸没物体	(29)
7.1.2 稳定热传导	(6)	(2.5) 降膜	(29)
(1) 单向热传导	(7)	(3) 过渡流区域的传热	(30)
(1.1) 平壁	(7)	(4) 湍流传热	(30)
(1.2) 圆筒壁	(7)	(4.1) 圆管	(30)
(1.3) 空心球壁	(7)	(4.2) 各种情况下的因次方程 式	(31)
(2) 多层物体串联时的热传导	(8)	(4.3) 环隙	(33)
(3) 具有内热源的多层串联热传 导	(8)	(4.4) 非圆形通道	(33)
7.1.3 不稳定热传导	(10)	(4.5) 蛇管	(34)
(1) 单向热传导	(10)	(4.6) 翅片管和翅片效率	(35)
(1.1) 解析法	(10)	(4.7) 管排	(36)
(1.2) 数值解法	(14)	(5) 在搅拌槽内有夹套和蛇管的传 热	(37)
(1.3) 平壁表面的传热	(15)	(6) 非牛顿型流体的传热	(38)
(2) 二向热传导	(13)	(6.1) 基础知识	(38)
(3) 有相变化的热传导	(18)	(6.2) 管内强制对流时的传热膜 系数	(43)
参考文献	(18)	(7) 液态金属的传热	(46)
7.2 对流传热	(19)	(8) 强制对流传热的强化	(47)
7.2.1 传热系数	(19)	(8.1) 螺旋槽管	(47)
(1) 能量方程式	(19)	(8.2) 横纹管	(48)
(2) 传热膜系数	(19)	(8.3) 管内加添加剂物	(48)
(3) 总传热系数	(20)	(8.4) 流体中加固体颗粒	(49)
(4) 传热膜系数的处理方法	(21)	参考文献	(50)
7.2.2 自然对流	(22)	7.3 有相变化时的传热	(51)
(1) 各种几何形状物体的Nusselt方 程式	(22)	7.3.1 冷凝传热	(51)
(2) 简化的因次方程式	(23)	(1) 冷凝机理——膜状冷凝和滴状 冷凝	(51)
(3) 同时有自然对流和辐射的热损 失	(23)	(2) 冷凝膜系数的计算公式	(51)
(4) 在封闭空间内的自然对流	(24)	(2.1) 垂直管或垂直平面上的膜 状冷凝	(51)
7.2.3 强制对流	(26)		
(1) 动量传递和热量传递之间的类			

(2.2) 倾斜平面的冷凝膜系数..... (52)	(2.5) 灰体..... (81)
(2.3) 水平管外饱和蒸气的冷凝膜系数..... (53)	(2.6) 克希霍夫 (Kirchhoff) 定律..... (81)
(2.4) 水平管内冷凝膜系数..... (54)	(3) 气体的热辐射..... (81)
(2.5) 单一饱和蒸气冷凝传热膜系数的设计计算用图表... (55)	(3.1) 气体热辐射的一般特点... (81)
(3) 含有不凝性气体的水蒸汽冷凝..... (56)	(3.2) 气体的辐射率..... (82)
(4) 过热蒸气的冷却和冷凝..... (56)	(3.3) 射线平均行程 (有效气层厚度)..... (82)
7.3.2 沸腾传热..... (56)	(3.4) 真实气体的辐射率..... (82)
(1) 沸腾机理..... (56)	(3.5) 气体的吸收率..... (85)
(2) 大容积内核状沸腾的传热膜系数..... (57)	(3.6) 真实气体的吸收率..... (85)
(3) 临界热负荷..... (60)	(4) 火焰的热辐射..... (85)
(4) 膜状沸腾的传热系数..... (60)	7.4.3 辐射换热..... (86)
(5) 管内沸腾的传热..... (61)	(1) 角系数..... (86)
(5.1) 水平管内两相流动..... (61)	(2) 黑表面围成的空间的辐射换热... (91)
(5.2) 垂直管内两相流动..... (62)	(3) 非黑表面围成的空间的辐射换热..... (91)
(5.3) 两相流动时各相的体积分数..... (63)	参考文献..... (93)
(5.4) 两相流动时的传热系数... (67)	7.5 传热过程的计算..... (94)
7.3.3 有相变化传热的强化..... (69)	7.5.1 传热过程的分析和传热基本关系式 (94)
(1) 单面纵槽管..... (69)	7.5.2 平均温度差..... (94)
(2) 双面纵槽管..... (69)	(1) 逆流或并流..... (95)
(3) 表面有多孔性覆盖层的传热管..... (70)	(2) 折流或错流..... (96)
(4) 低螺纹翅片管..... (71)	(3) 平均温度差校正因子 F_T (97)
参考文献..... (72)	7.5.3 总传热系数..... (99)
7.4 辐射传热..... (73)	(1) 总传热系数 K 值的计算..... (99)
7.4.1 热辐射的基本性质..... (73)	(2) 总传热系数 K 值的大致范围... (100)
7.4.2 物体的热辐射..... (73)	7.5.4 污垢系数和污垢热阻..... (103)
(1) 黑体的热辐射..... (73)	(1) 污垢的形成及其对传热的影响 (103)
(1.1) 黑体的辐射性质..... (73)	(2) 污垢的控制..... (103)
(1.2) 黑体的辐射强度和辐射能力..... (73)	(3) 污垢性质和除垢时间..... (103)
(1.3) 黑体辐射遵循的几个基本定律..... (74)	(4) 污垢的清除和防垢剂..... (103)
(2) 实际固体的热辐射..... (75)	(5) 污垢热阻的经验数据..... (104)
(2.1) 实际固体的辐射、吸收和反射..... (75)	7.5.5 壁温的计算..... (105)
(2.2) 实际固体的辐射率..... (75)	7.5.6 热效率及传热单元数..... (106)
(2.3) 实际固体的吸收率..... (80)	(1) 热效率..... (106)
(2.4) 实际固体的反射率..... (81)	(2) 热效率和传热单元数关联式... (107)
	(3) ϵ -NTU 法的应用和讨论..... (109)
	7.5.7 用 Wilson 法从实验数据推求膜系数关联式..... (112)
	(1) Wilson 图解法..... (112)
	(2) 修正的 Wilson 法..... (114)
	参考文献..... (114)
	附录 MKfS 制与 SI 制换算简表..... (115)

《 化学工程手册 》总篇目

1. 化工基础数据
2. 化工应用数学
3. 化工热力学
4. 流体流动
5. 搅拌及混合
6. 流体输送机械及驱动装置
7. 传热
8. 传热设备及工业炉
9. 蒸发及结晶
10. 传质
11. 蒸馏
12. 气体吸收
13. 气液传质设备
14. 萃取及浸取
15. 增湿与减湿
16. 干燥
17. 吸附及离子交换
18. 薄膜过程
19. 颗粒及颗粒系统
20. 流态化
21. 气态非均一系分离
22. 液固分离
23. 粉碎、分级及团聚
24. 化学反应工程
25. 化工自动控制
26. 化工系统工程

概 述

传热有三种基本方式：传导、对流和辐射。这三种传热方式很少单独存在，往往是相互伴随着同时出现。本篇就这三种主要传热方式的基本定律、应用和有关计算作了系统的介绍。至于传热设备的结构型式、设计计算的问题在第8篇中讨论。

传导 热能从物体的一部分传至另一部分，或从一物体传至与其相接触的另一物体，这种传热方式称为传导。在热传导过程中，物体内部各分子的相对位置没有变动。

对流 在流体中，由于流体质点的移动，将热能从一处传至另一处，称为对流传热。这种流体质点的移动，或者是由于温度差所引起的密度差而产生的，或者是由于外界的机械作用而产生的。前者称为自然对流，而后者称为强制对流。当强制对流所产生的速度很低时，自然对流对传热也产生很重要的影响。

辐射 一物体以电磁波的形式发射能量，将热能转变为辐射能，这种辐射能在遇到另一物体时，就部分地或全部地被物体所吸收而转变为热能。以这种方式传热的称为辐射传热。在辐射传热过程中，两物体并不接触，也无需任何传递介质。

7.1 热 传 导

7.1.1 热传导基本方程式和导热系数

(1) 傅立叶 (Fourier) 定律

傅立叶定律是研究以热传导方式传热的基本定律。此定律指出, 传热速率与温度梯度和传热面积成正比。其数学表达式为

$$\frac{dQ}{d\theta} = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (1-1)$$

式中 Q ——传导的热量, kcal;

θ ——时间, h;

$dQ/d\theta$ ——热传导的传热速率 (即在 $d\theta$ 时间内的传热量), kcal/h;

t ——温度, °C;

x ——在 x 方向等温面之间的垂直距离, m;

dt/dx ——在热流方向上温度随距离的变化率, 即温度梯度;

A ——垂直于热流方向的传热面积, m^2 ;

λ ——比例系数, 称为导热系数, 是物质的物理性质之一并随温度而变, kcal/m·h·°C。

负号表示热流与温度梯度的方向相反。

(2) 三向热传导微分方程式

傅立叶定律是推导固体或静止流体在不稳定状态下三向热传导方程式的基础。在一均匀物体中取一微元体, 在三向坐标系统中作热量衡算, 即得如下微分方程式:

$$c_p \gamma \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q' \quad (1-2)$$

式中 x, y, z ——在三向坐标系统中的距离, m;

c_p ——物体的比热, kcal/kg·°C;

γ ——物体的重度, kg/m³;

q' ——单位体积固体在单位时间内所发出的热量, 通称内热流 (例如由化学反应、核反应或电流产生的热量), kcal/m³·h。

其余符号及单位同前。

式 (1-2) 说明一具有内热流的物体的温度随时间和位置的变化情况。对于某些几何形状较简单的物体 (例如平板、圆筒、球体), 给出边界条件和初始条件, 就可解出这一微分方程式, 从而获得此物体的温度分布情况。

(3) 导热系数

各种物质的导热系数差别很大。一般说来, 金属的导热系数最大, 非金属固体和液体的导热系数较小, 而气体的最小。即使同一种物质在相同温度下, 也由于它的表观密度、湿度

等差别而具有不同的导热系数。例如, 表观密度为 404kg/m^3 的石棉毛在 0°C 时的导热系数为 $0.0774\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$; 而表观密度为 706kg/m^3 的石棉毛在 0°C 时的导热系数却为 $0.165\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$, 比前一数值竟高出一倍多。对于组成和结构固定的物料, 导热系数为温度的函数。本手册第一篇《化工基础数据》提供一些气体、液体和固体(包括金属、合金、建筑材料、保温材料等)的导热系数的数据, 并推荐了一些预计导热系数的经验公式。本分册为了便于查用, 提供了一部分常用物料的导热系数。

表1-1 液体的导热系数

λ [kcal/m·h·°C]							
液	体	t·°C	λ	液	体	t·°C	λ
醋酸100%		20	0.147	对二甲苯		30	0.116
50%		20	0.298			60	0.118
丙酮		30	0.152	正癸烷		30	0.126
		75	0.141			60	0.124
烯丙醇		25~30	0.155	二氯二氟甲烷		-7	0.085
氨		-15~30	0.432			16	0.079
氨, 26%水溶液		20	0.388			38	0.071
		60	0.432			60	0.064
醋酸戊酯		10	0.123			82	0.057
戊醇(正)		30	0.140	二氯乙烷		50	0.122
		100	0.146	二氯甲烷		-15	0.165
戊醇(异)		30	0.131			30	0.143
		75	0.129	醋酸乙酯		20	0.150
苯胺		0~20	0.149	乙醇100%		20	0.156
苯		30	0.137	80%		20	0.204
		60	0.129	60%		20	0.262
溴苯		30	0.110	40%		20	0.333
		100	0.104	20%		20	0.418
醋酸丁酯(正)		25~30	0.126	100%		50	0.129
正丁醇		30	0.144	乙苯		30	0.123
		75	0.141			60	0.122
异丁醇		10	0.135	溴乙烷		20	0.104
氯化钙盐水, 30%		30	0.476	乙醚		30	0.119
15%		30	0.506			75	0.116
二硫化碳		30	0.138	碘乙烷		40	0.095
		75	0.131			75	0.094
四氯化碳		0	0.159	乙二醇		0	0.228
		68	0.140	汽油		30	0.116
甘油 100%		20	0.244	全氯乙烯		50	0.137
80%		20	0.231	石油醚		30	0.112
60%		20	0.327			75	0.109
40%		20	0.386	正丙醇		30	0.147
20%		20	0.414			75	0.141
100%		100	0.244	异丙醇		30	0.135
正庚烷		30	0.120			60	0.134
		60	0.113	钠		100	73
正己烷		30	0.119			210	68.5
		60	0.116	氯化钠盐水25%		30	0.491
正庚醇		30	0.140	12.5%		30	0.506
		75	0.135	硫酸90%		30	0.313

续表

液	体	t°C	λ	液	体	t°C	λ
正己醇		30	0.138	60%		30	0.372
		75	0.134	30%		30	0.446
煤油		20	0.128	二氧化硫		-15	0.191
		75	0.120			30	0.165
汞		28	7.19	甲苯		30	0.128
甲醇	100%	20	0.185			75	0.125
	80%	20	0.229	β -三氯乙烷		50	0.115
	60%	20	0.283	三氯乙烯		50	0.119
	40%	20	0.348	松节油		15	0.110
	20%	20	0.423	凡士林		15	0.158
	100%	50	0.170	水		0	0.510
氯甲烷		-15	0.165			38	0.540
		30	0.132			93	0.585
硝基苯		30	0.141			146	0.587
		100	0.131			216	0.560
硝基甲烷		30	0.186			327	0.409
		60	0.179	邻二甲苯		20	0.134
正辛烷		30	0.123	对二甲苯		20	0.134
		60	0.120				
油类		30	0.117				
蓖麻油		20	0.155				
		100	0.149				
橄榄油		20	0.144				
		100	0.141				
三聚乙醛		30	0.125				
		100	0.116				
正戊烷		30	0.116				
		75	0.110				
氯苯		10	0.123				
氯仿		30	0.119				

摘自 Perry: "Chemical Engineers' Handbook", 5th ed.

注. $1 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{1}{0.86} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

表1-2 气体的导热系数

 λ [kcal/m·h·°C]

温 度		气 体									
K	°C	空气	NH ₃	CCl ₄	CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂	H ₂ O(汽)
100	-173	0.0080	...	...	...	...	0.0576	0.0093	0.0083	0.0080	
150	-123	0.0119	...	...	...	...	0.0869	0.0158	0.0120	0.0119	
200	-73	0.0155	0.0132	...	0.0681	...	0.113	0.0187	0.0157	0.0157	...
250	-23	0.0190	0.0169	...	0.0112	...	0.135	0.0236	0.0191	0.0194	...
300	27	0.0225	0.0212	0.00594	0.0143	0.0185	0.157	0.0294	0.0223	0.0229	0.525 (液)
350	77	0.0258	0.0262	0.00731	0.0175	0.0244	0.176	0.0344	0.0252	0.0256	0.576 (液)
400	127	0.0291	0.0318	0.00869	0.0209	0.0306	0.149	0.0424	0.0281	0.0284	0.0229
450	177	0.0321	0.0378	0.0100	0.0244	0.0375	0.212	0.0498	0.0309	0.0312	0.0266
500	227	0.0350	0.0451	0.0112	0.0280	...	0.228	0.0574	0.0334	0.0354	0.0308
600	327	0.0404	0.0576	0.0124	0.0350	...	0.262	0.0733	0.0384	0.0407	0.0398
700	427	0.0450	...	0.0136	0.0414	...	0.294	0.0900	0.0428	0.0445	0.0505
800	527	0.0493	...	...	0.0474	...	0.325	...	0.0471	0.0506	0.0609
900	627	0.0533	...	...	0.0531	...	0.354	...	0.0514	0.0558	0.0724
1000	727	0.0575	...	...	0.0586	...	0.386	...	0.0556	0.0610	0.0840
1200	927	0.0656	...	...	0.0688	...	0.454	...	0.0654	0.0705	...

$$1 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{1}{0.86} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

摘自Perry, "Chemical Engineers' Handbook", 5th ed.

表1-3 空气的导热系数

 λ [kcal/m·h·°C]

温度 °C	压 力 (kg/cm ²)			
	1	100	150	200
0	0.0210	0.0268	0.0304	0.0340
100	0.0276	0.0313	0.0335	0.0358
200	0.0338	0.0365	0.0382	0.0398
300	0.0396	0.0417	0.0430	0.0444
400	0.0448	0.0466	0.0476	0.0487
500	0.0494	0.0509	0.0518	0.0527
600	0.0536	0.0549	0.0557	0.0565
700	0.0577	0.0588	0.0593	0.0602
800	0.0617	0.0627	0.0633	0.0640
900	0.0656	0.0665	0.0671	0.0676
1000	0.0694	0.0702	0.0707	0.0712

$$\text{注: } 1 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{1}{0.86} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

摘自“化学工学便览”，改订三版。

表1-4 水和水蒸汽的导热系数

 λ [kcal/m·h·°C]

压 力		温 度, °C										
巴	kg/cm ²	0	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700
1	1.02	0.490	0.553	0.6214	0.6247	0.6286	0.6328	0.6374	0.6472	0.6580	0.6695	0.6811
50	51	0.493	0.557	0.588	0.594	0.575	0.532	0.0451	0.0518	0.0520	0.0731	0.0849
100	102	0.496	0.560	0.591	0.595	0.578	0.537	0.469	0.0599	0.0608	0.0764	0.0885
150	153	0.500	0.564	0.595	0.600	0.582	0.544	0.480	0.0707	0.0725	0.0837	0.0930
200	204	0.503	0.566	0.597	0.602	0.586	0.549	0.491	0.092	0.0796	0.0869	0.0971
250	255	0.506	0.570	0.600	0.605	0.589	0.556	0.501	0.185	0.0886	0.092	0.101
300	306	0.509	0.573	0.603	0.607	0.592	0.561	0.509	0.227	0.0997	0.098	0.107
350	357	0.513	0.575	0.605	0.610	0.596	0.565	0.517	0.802	0.118	0.105	0.111
400	408	0.515	0.578	0.608	0.613	0.600	0.570	0.524	0.886	0.132	0.112	0.116
450	459	0.518	0.581	0.611	0.616	0.603	0.574	0.530	0.368	0.155	0.119	0.122
500	510	0.521	0.583	0.613	0.619	0.605	0.577	0.535	0.375	0.177	0.128	0.127

注: $1 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{1}{0.86} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

水的 λ 值高, 蒸汽的 λ 值低得多, 从横排数值可见, 从液态变为汽态时, λ 值显著下降。

摘自Perry: "Chemical Engineers' Handbook", 5th ed.

表1-5 金属和合金的导热系数

 λ [kcal/m·h·°C]

物料	0	100	200	300	400	500	600	熔点, °C
铝	174	177	183	198	214	231	...	660
黄铜 (70~30)	83.3	89.2	93.6	98.1	99.6	...	...	940
铸铁	47.6	44.6	41.6	38.6	37.2	...	...	1275
高硅铸铁	44.6	...	...	...	...	...	...	1260
铜 (纯)	333	324	320	315	312	308	304	1083
铅	29.8	28.2	27	27	...	...	...	327.5
镍	53.5	50.6	49.1	47.6	...	...	...	1452
银	360	354	...	...	...	...	...	960.5
钠	120.5	...	...	...	...	...	...	97.5
钢	...	38.7	38.7	37.2	34.2	32.7	31.2	1375
钽(18°C)	47.6	...	...	...	...	...	...	2850
锡	53.5	50.6	49.1	...	...	...	...	231.85
熟铁	...	47.6	44.6	41.6	38.6	34.2	...	1605
锌	96.6	95.1	92.2	87.8	80.3	...	...	419.4

注: $1 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{1}{0.86} \text{ W/m} \cdot \text{K}$

摘自Perry "Chemical Engineers' Handbook", 5th ed.

建筑材料和保温材料的导热系数见第八篇《传热设备和工业炉》。

7.1.2 稳定热传导

在稳定情况下进行热传导时, 传过的热量以及温度等参数均不随时间而变, 因而式 (1-1) 中 $dQ/d\theta$ 项应为常数, 可以用 Q/θ 或 q 代替之。同理, 在式 (1-2) 中, $\partial t/\partial \theta = 0$ 。

通常, 导热系数 λ 不是常数, 而是温度的函数。但在大多数情况下, 在很宽的温度范围内, 导热系数与温度呈线性关系。可在温度区间内取导热系数的平均值而将 λ 从积分或微分

符号中提出来, 于是式 (1-1) 和 (1-2) 分别写成下列形式:

$$q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A} = -\lambda \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (1-3)$$

$$\nabla^2 t = -q' / \lambda \quad (1-4)$$

式 (1-4) 中, $\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$, ∇^2 为拉普拉斯算符。

(1) 单向热传导

很多热传导问题可按单向传热来处理, 例如平壁热传导, 热流垂直于壁面而向平壁厚度的方向流过; 对于圆筒、中空球罐则沿半径方向向四周的筒壁、球壁传热。在这种情况下, 式 (1-4) 将大为简化 (即只有 x 向而无 y 、 z 向的各项), 但利用式 (1-4) 求解较为繁琐, 利用式 (1-3) 则简便得多。

(1.1) 平壁

对于平壁, 面积 A 不随 x 而变 (即 $A = \text{常数}$), 因而积分式 (1-3) 并整理后得:

$$q = \frac{\lambda A (t_1 - t_2)}{x_2 - x_1} = \frac{\lambda A \Delta t}{b} \quad (1-5)$$

式中 $b = x_2 - x_1$ 为平壁厚度, m ;

$\Delta t = t_1 - t_2$, 为平壁两面的温度差, $^{\circ}C$ 。

其余符号同前。

式 (1-5) 可改写为下列形式:

$$q = \frac{\Delta t}{b/(\lambda A)} = \frac{\Delta t}{R} \quad (1-5a)$$

此处, $R = b/(\lambda A)$, 称为热阻, 而温度差 Δt 就是导热的推动力。

(1.2) 圆筒壁

对于圆筒壁, 热传导方向是径向的, 且面积 A 为半径 r 的函数, 即 $A = 2\pi rL$ (L 为圆筒长度)。于是, 式 (1-3) 等号左侧变为

$$-\frac{q}{2\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}。 \text{将该式积分并整理后, 得:}$$

$$q = \frac{\Delta t}{b/(\lambda A_{lm})} \quad (1-6)$$

式中, $A_{lm} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)}$, 为对数平均面积, A_1 、 A_2 分别为圆筒壁的内、外表面积, m^2 ;

即 $A_1 = 2\pi r_1 L$, $A_2 = 2\pi r_2 L$, $A_{lm} = 2\pi r_{lm} L$, 而 $r_{lm} = \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)}$ (对数平均半径), r_1 、 r_2

为圆筒壁的内外半径, m ; r_1 、 r_2 分别为圆筒的内径和外径; 式中的 b 表示圆筒壁的厚度, 即 $b = r_2 - r_1$ 。当 $A_2/A_1 < 2$ 时, 可用算术平均面积代替对数平均面积, 即 $A_m = (A_1 + A_2)/2$, 这时误差不超过 4%, 对于工程计算是容许的。

(1.3) 空心球壁

对于空心球壁, $A = 4\pi r^2$, 同样代入式 (1-3) 中, 积分并整理后, 得:

$$q = \frac{\Delta t}{b/(\lambda A_{gm})} \quad (1-7)$$

式中 b ——空心球的壁厚, $b=r_2-r_1$, m ;

r_1 、 r_2 ——分别为球的内径和外径; A_{gm} ——空心球的几何平均面积, $A_{gm}=\sqrt{A_1 A_2}$,

A_1 、 A_2 分别为球的内、外表面积, m^2 ; $A_1=4\pi r_1^2$, $A_2=4\pi r_2^2$.

比较式(1-5a)、(1-6)和(1-7), 可见三式的基本形式相同, 其差别只表现在面积 A 的计算而已。

(2) 多层物体串联时的热传导

图 1-1 说明三层物体串联时稳定热传导的温度分布。在稳定热传导时, 通过每一层物体的热流必相等, 于是有下列关系:

$$q = \frac{\lambda_1 A_1 \Delta t_1}{b_1} = \frac{\lambda_2 A_2 \Delta t_2}{b_2} = \frac{\lambda_3 A_3 \Delta t_3}{b_3} \quad (1-8)$$

若以热阻表示, 则上式变为:

$$\Delta t_1 = q R_1, \Delta t_2 = q R_2, \Delta t_3 = q R_3 \quad (1-8a)$$

将各层温度差相加得:

$$q(R_1 + R_2 + R_3) = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = \Sigma \Delta t \quad (1-9)$$

由此得:

$$q = \frac{\Sigma \Delta t}{R_r} = \frac{t_1 - t_4}{R_r} \quad (1-9a)$$

此处, R_r 为串联时各层热阻之和, 称为总热阻。

应用上式时, 应该注意各层之间相接处可能没有完全排除空气, 而这种附加的热阻是不能忽略的。

(3) 具有内热源的多层串联热传导

在稳定情况下, 对于具有内热源的单向热传导, 式(1-2)或式(1-4)将变为更简单的形式:

对平壁:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = -\frac{q'}{\lambda} \quad (1-10)$$

对圆筒壁:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) = -\frac{q'}{\lambda} \quad (1-11)$$

对空心球壁:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dt}{dr} \right) = -\frac{q'}{\lambda} \quad (1-12)$$

式(1-10)、(1-11)和(1-12)也可根据傅立叶定律和热量衡算直接推导出来。对这些二阶微分方程式分别积分后得:

$$\text{平壁:} \quad t = -\frac{q' x^2}{2\lambda} + c_1 x + c_2 \quad (1-13)$$

$$\text{圆筒壁:} \quad t = -\frac{q' r^2}{4\lambda} + c_1 \ln r + c_2 \quad (1-14)$$

$$\text{空心球壁:} \quad t = -\frac{q' r^2}{6\lambda} - \frac{c_1}{r} + c_2 \quad (1-15)$$

式中的积分常数 c_1 和 c_2 可由边界条件来确定, 即由系统中已知位置处的温度和温度梯度确定之。

如果此导热固体放在一具有不同温度的环境中(例如在热空气中加热或在水中冷却等), 则在稳定情况下, 由热传导至固体表面的热量必等于传给周围流体的热量, 这一边界条件可以下式表示之:

$$\alpha_r(t_s - t') = \lambda \left(\frac{dt}{dx} \right)_{\text{表面}} \quad (1-16)$$

式中 α_r ——固体表面至周围流体的传热膜系数, $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$,

t_s ——固体表面温度, $^\circ\text{C}$;

t' ——周围流体温度, $^\circ\text{C}$;

其余符号同前。

式(1-13)、(1-14)和(1-15)指出, 不同几何形状的物体在不同情况下导热时的温度分布, 并显示了内热源项 q' 对温度分布的影响。运用这些公式计算串联热传导较为复杂, 现举例说明如下。

例1-1 有一平板式核燃料单元, 由厚为3.2mm的铀-锆合金板(即核燃料)和两侧各覆盖一层厚为0.64mm的锆板所组成。锆板外用 200°C 的高压水冷却, 传热膜系数为 $36,600 \text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 。若核燃料中间平面的温度不得超过 550°C , 试求此核燃料发出的最大热流量 q' , 以 $\text{kcal}/\text{h} \cdot \text{m}^2$ 表示。已知锆和锆合金的导热系数为 $17.8 \text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

解 这是平壁热传导的例子, 可利用式(1-10)分别对每一种材料积分, 所不同的只是覆盖物锆板的发热量为零, 而核燃料的发热量由方程式积分来确定。今令核燃料的中间平面处为 $x=0$, 则在锆板和核燃料的界面处为 $x_1=1.6\text{mm}$ (即核燃料厚度的一半位置处), 而锆板 and 水的界面处为 $x_2=2.24\text{mm}$ (图1-2)。并令下标 c 、 f 分别表示覆盖物(锆板)和核燃料(铀-锆合金板)。

本题的边界条件为:

对核燃料, 在 $x=0$ 处, $t_f=550^\circ\text{C}$, 又核燃料自身在 $x=0$ 处的温度已规定为 550°C 而不变, 即 $dt_f/dx=0$ 。在核燃料和锆板界面 $x=x_1$ 处, $t_f=t_c$ 。又在稳定情况下, 通过核燃料和锆板的导热热量相等, 即:

$$\lambda_f \frac{dt_f}{dx} = \lambda_c \frac{dt_c}{dx} \quad (a)$$

对锆板, 在 $x=x_2$ 处, 由式(1-16)得:

$$t_c - 200 = -\frac{\lambda_c}{36,600} \frac{dt_c}{dx} \quad (b)$$

对核燃料, 将式(1-10)第一次积分得:

$$\frac{dt_f}{dx} = -\frac{q'}{\lambda_f} x + c_1$$

由边界条件, 当 $x=0$ 时, $dt_f/dx=0$, 由此, 式中的积分常数 $c_1=0$, 于是上式变为:

$$\frac{dt_f}{dx} = -\frac{q'}{\lambda_f} x \quad (c)$$

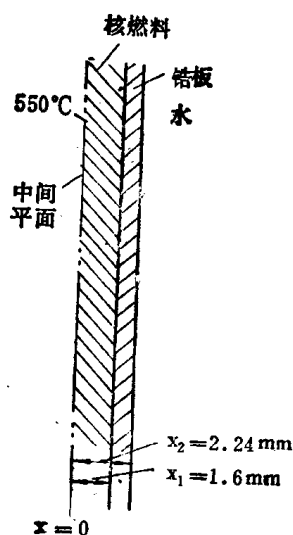


图1-2 例1-1附图